

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахунково-графічної роботи
з курсу

ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

*(для студентів 3 курсу заочної форми навчання
за напрямом 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти, за спеціальністю
7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання (за видами))*

Харків
ХНУМГ
2015

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з курсу «Теорія автоматичного керування» (для студентів 3 курсу заочної форми навчання за напрямом 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти, за спеціальністю 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання (за видами)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: І. Г. Абраменко, А. О. Карюк, Д. В. Рум'янцев. – Харків : ХНУМГ, 2015. – 23 с.

Укладачі: к.т.н. І. Г. Абраменко
А. О. Карюк
Д. В. Рум'янцев

Рецензент: В. М. Гаряжа, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою «Електропостачання міст»,
протокол № 2 від 17.10.2014 р.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ	5
1.1 Перелік питань, що підлягають розгляду	7
1.2 Методичні вказівки по виконанню роботи	8
2 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	11
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	22

ВСТУП

Відповідно до навчального плану за напрямом 6.050701 – Електротехнічні системи електроспоживання при вивченні курсу «Теорія автоматичного керування» (ТАК) студенти 3 курсу заочної форми навчання та слухачі другої вищої освіти виконують розрахунково-графічну роботу, яка об'єднує в собі основні етапи проектування лінійних систем автоматичного керування.

Мета роботи – систематизувати, закріпити та розширити знання, отримані на лекціях і практичних заняттях; розвинути здатність до самостійної роботи з технічною літературою; придбати творчі навички самостійного вирішення технічних завдань, пов'язаних з проектуванням систем автоматичного керування.

Вихідними даними при виконанні роботи є принципова схема системи автоматичного керування і параметри її елементів.

У методичних вказівках наведені 45 варіантів завдань. Перелік питань, що підлягають розгляду, для всіх завдань однаковий.

Результатом виконання розрахунково-графічної роботи є пояснювальна записка, в якій повинні бути наведені обґрунтування прийнятих при виконанні розділів роботи рішень, основні результати розрахунків по всіх етапах проектування та висновки по його підсумках. Записка повинна бути оформлена відповідно до вимог стандартів ДСТУ, обсягом 10-15 сторінок формату А4.

1 ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ

На рисунку 1 наведена принципова схема системи «генератор-двигун» (Г - Д) автоматичної стабілізації швидкості обертання електродвигуна постійного струму незалежного збудження.

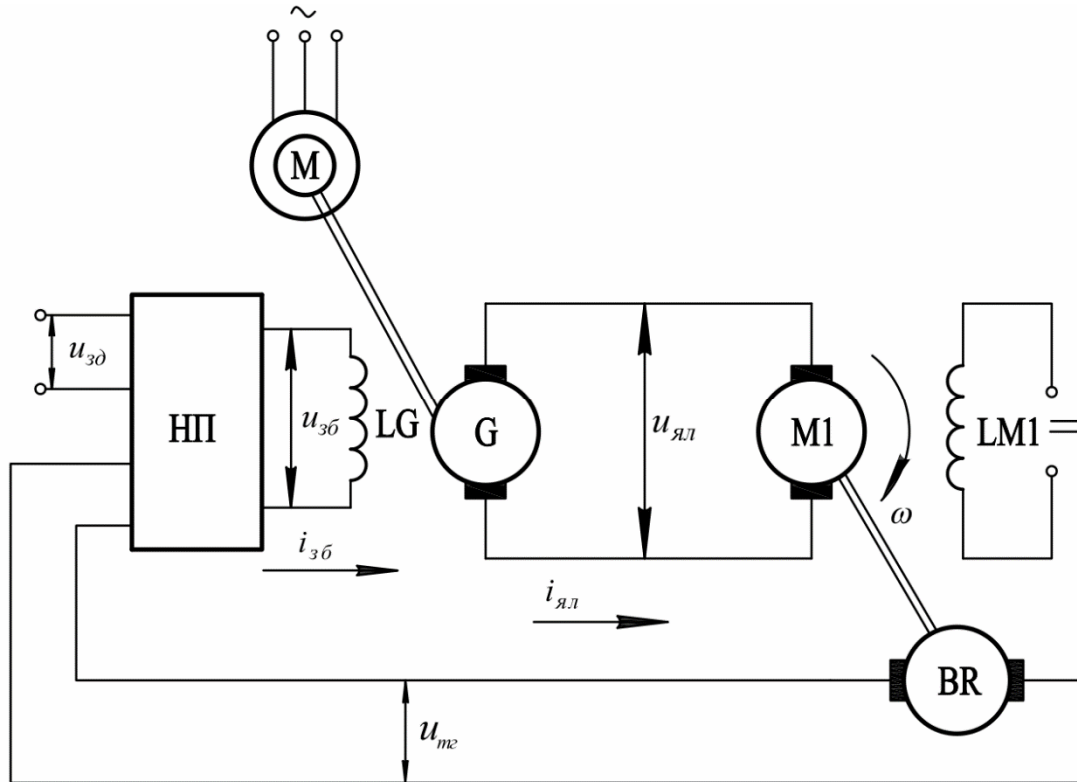


Рисунок 1 – Принципова схема системи Г-Д

На схемі прийняті наступні позначення: *НП* – напівпровідниковий підсилювач; *G* – генератор постійного струму; *M1* – керований електродвигун постійного струму; *BR* – тахогенератор; *LG*, *LM1* – обмотки збудження, відповідно генератора *G* і двигуна *M1*; *M* – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; $i_{зб}$, $u_{зб}$ – струм та напруга обмотки збудження генератора; $i_{ял}$ – струм якірного ланцюга системи генератор-двигун; ω – кутова швидкість обертання валу двигуна; $u_{ял}$ – напруга на якірній обмотці двигуна; $u_{зд}$ – напруга сигналу завдання; $u_{тг}$ – вихідна напруга тахогенератора.

Числові значення параметрів елементів схеми наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення параметрів елементів схеми

№ варіанта	Генератор			Електродвигун				Тахогенератор
	$L_{зг},$ $Гн$	$R_{зг},$ $Ом$	$\alpha,$ $град$	$L_{яд},$ $Гн$	$R_{яд},$ $Ом$	$J,$ $кгм^2$	$c,$ $Нм / А$	
1	1,24	0,6	39,7	0,006	0,13	1,26	0,64	0,08
2	1,61	0,55	35,7	0,011	0,26	1,38	0,6	0,12
3	1,23	0,55	42,2	0,011	0,16	0,37	0,69	0,12
4	1,24	0,52	38,0	0,005	0,21	1,39	0,69	0,1
5	1,51	0,55	35,3	0,004	0,13	1,02	0,65	0,12
6	1,26	0,56	44,1	0,009	0,22	0,33	0,65	0,12
7	1,69	0,57	43,1	0,015	0,15	0,56	0,63	0,07
8	1,69	0,54	38,3	0,007	0,23	0,91	0,69	0,06
9	1,63	0,54	39,3	0,01	0,24	1,44	0,64	0,15
10	1,29	0,6	38,8	0,006	0,25	1,45	0,61	0,07
11	1,6	0,5	33,1	0,012	0,19	0,40	0,68	0,05
12	1,51	0,59	34,5	0,006	0,12	1,46	0,64	0,11
13	1,78	0,59	37,1	0,009	0,15	1,44	0,62	0,14
14	1,59	0,58	33,5	0,011	0,28	0,83	0,64	0,12
15	1,68	0,51	42,7	0,014	0,13	1,24	0,61	0,07
16	1,47	0,53	32,9	0,015	0,27	0,38	0,61	0,09
17	1,46	0,53	33,4	0,01	0,21	0,75	0,69	0,1
18	1,70	0,57	32,6	0,005	0,30	1,39	0,70	0,15
19	1,25	0,51	33,4	0,005	0,12	1,23	0,66	0,07
20	1,28	0,57	36,5	0,006	0,19	1,45	0,61	0,14
21	1,3	0,51	34,7	0,013	0,12	1,05	0,62	0,11
22	1,43	0,57	43,9	0,006	0,29	0,25	0,64	0,09
23	1,7	0,55	36,5	0,013	0,1	1,3	0,68	0,07
24	1,68	0,58	32,8	0,006	0,25	1,41	0,6	0,09
25	1,24	0,57	43,6	0,014	0,26	1,08	0,6	0,1
26	1,44	0,59	44,7	0,007	0,27	1,19	0,62	0,06
27	1,52	0,59	36,6	0,005	0,12	1,17	0,66	0,11
28	1,45	0,53	31,7	0,006	0,18	0,71	0,67	0,07
29	1,59	0,57	33,9	0,01	0,15	1,05	0,66	0,09
30	1,58	0,52	36,1	0,009	0,26	0,42	0,65	0,11

№ варіанта	Генератор			Електродвигун				Тахогенератор
	$L_{32},$ $Гн$	$R_{32},$ $Ом$	$\alpha,$ $град$	$L_{яд},$ $Гн$	$R_{яд},$ $Ом$	$J,$ $кгм^2$	$c,$ $Нм / А$	$k_{тг},$ $сВ$
31	1,38	0,5	38,9	0,007	0,19	1,12	0,65	0,08
32	1,46	0,57	33,9	0,013	0,28	0,24	0,63	0,08
33	1,21	0,55	39,0	0,01	0,14	0,56	0,67	0,11
34	1,79	0,55	40,7	0,01	0,15	0,26	0,62	0,08
35	1,24	0,6	39,7	0,006	0,13	1,26	0,64	0,08
36	1,49	0,58	36,4	0,008	0,21	1,44	0,68	0,11
37	1,4	0,56	37,6	0,01	0,13	0,24	0,61	0,06
38	1,77	0,52	31,3	0,004	0,27	0,77	0,69	0,14
39	1,75	0,52	33,9	0,004	0,22	0,7	0,68	0,14
40	1,23	0,59	42	0,009	0,17	1,2	0,65	0,13
41	1,64	0,5	30,4	0,012	0,2	1,23	0,64	0,08
42	1,36	0,55	43,9	0,014	0,18	0,44	0,64	0,11
43	1,45	0,52	41	0,005	0,12	0,84	0,63	0,05
44	1,53	0,6	37,3	0,01	0,15	0,78	0,65	0,09
45	1,77	0,57	38,7	0,009	0,12	1,04	0,65	0,08

Тут: L_{32} , R_{32} – індуктивність і активний опір обмотки збудження генератора; α – кут нахилу дотичної до характеристики холостого ходу генератора в точці рівноваги; $L_{яд}$, $R_{яд}$ – індуктивність і активний опір якірної обмотки електродвигуна; J – момент інерції; $c = k\Phi$; Φ – магнітний потік; $k = pN/2\pi a$ – конструктивний коефіцієнт електродвигуна; $k_{тг}$ – коефіцієнт передачі тахогенератора.

1.1 Перелік питань, що підлягають розгляду

В роботі студенти у відповідності до номера варіанта, виданого викладачем, повинні розглянути слідуєчі питання:

- дати короткий опис роботи САК за принциповою схемою;
- розділити систему на елементи і скласти її функціональну схему;
- скласти лінеаризовані диференціальні рівняння для кожного елемента;
- одержати вирази для коефіцієнтів передачі і постійних часу;

- скласти передаточні функції для кожного елемента;
- скласти структурну схему САК;
- визначити передаточну функцію замкнутої САК по задаючому впливові;
- скориставшись критерієм Гурвіца, визначити граничне значення передаточного коефіцієнта напівпровідникового підсилювача k_{nn} , при якому САК залишається стійкою;
- визначити перехідну характеристику системи по каналу задаючого впливу при значенні k_{nn} , яке забезпечує 10 % перерегулювання, і привести відповідну програму розрахунку в *MatLab*, передаточну функцію $W_{\omega, u_{30}}(s)$ та графік $h(t)$;
- побудувати логарифмічні частотні характеристики замкнутої системи за задаючим впливом;
- визначити напругу сигналу завдання u_{30} , який забезпечує необхідне значення керованої координати $n = 1500 \text{ об/хв}$;
- провести перевірку знаходження внутрішніх змінних в допустимих діапазонах використовуючи блок-схему САК Г-Д, сформовану в інтерактивному середовищі *Simulink*.
- зробити висновки про одержані результати.

1.2 Методичні вказівки по виконанню роботи

Перш ніж почати виконання розрахункової частини роботи, необхідно чітко усвідомити принцип дії системи управління, приймаючи до уваги, що система побудована за принципом відхилення. Потім слід виявити особливості функціонування кожного її елемента і на підставі цього дати короткий, але вичерпний опис процесу зменшення відхилення регульованої величини від заданого значення, що виник під дією зміни керуючого або збуджуючого впливів.

При опису САК її доцільно формально розділити на окремі елементи, виявити взаємозв'язки між цими елементами і відобразити їх у вигляді функціональної схеми. При цьому під функціональною схемою САК мається на увазі умовне графічне зображення, що відображає функції, які виконують окремі елементи системи, і зв'язки між цими елементами.

Частинами функціональної схеми є умовні зображення функціональних елементів, а також зв'язків між ними у вигляді ліній зі стрілками. Стрілки показують напрямок передачі сигналів взаємодії. Функціональні елементи зображують у вигляді прямокутників, усередині яких записують їхню назву.

Для проектуємої системи доцільно виділити наступні функціональні елементи: об'єкт керування – двигун; генератор; регулятор – напівпровідниковий підсилювач; датчик – тахогенератор.

Першим етапом розрахункової частини роботи є складання диференціальних рівнянь елементів системи. Загальний порядок складання диференціальних рівнянь полягає в наступному:

- приймаються допущення, що дозволяють спростити розгляд динамічних властивостей елементів і їхній математичний опис;
- з урахуванням допущень записують рівняння, що відображають фізичні закони, яким підкоряється даний елемент.

У роботі розрахунок ведуть з позицій лінійної теорії, тому одержані рівняння необхідно лінеаризувати. З цією метою для кожної координати розглядаються малі відхилення щодо сталого режиму. В околиці цих відхилень необхідно зробити лінеаризацію наявних нелінійних залежностей шляхом розкладання їх у ряд Тейлора і відкидання членів розкладання, що містять відхилення вище першого порядку. Підставляючи лінеаризовані залежності у відповідні диференціальні рівняння з урахуванням рівнянь статички, одержують лінійні рівняння, справедливі для малих відхилень.

Приводячи ці рівняння до прийнятої в теорії автоматичного керування стандартної форми, тобто розташовуючи їх за старшинством похідних, одержують остаточні рівняння, які представляють собою вихідні дані для побудови структурної схеми та подальших досліджень системи.

Одержані рівняння далі слід записати у вигляді передаточних функцій, тобто у вигляді відношень вихідних величин до вхідних, перетворених за Лапласом при нульових початкових умовах. Для визначення передаточних функцій елементів системи слід використати інтегральне перетворення Лапласа:

$$F(s)L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt.$$

Передаточна функція є самою компактною формою опису властивостей САК. Вона встановлює зв'язок між вхідною і вихідною величинами як у динамічному, так і у статичному режимах. Передаточна функція є функцією комплексної змінної $s = \alpha + j\beta$.

При аналізі САК широке застосування одержали так звані структурні схеми. Під структурною схемою САК мається на увазі умовне графічне зображення математичної моделі системи у вигляді сукупності окремих ланок із вказівкою зв'язків між ними.

Ця схема, по суті, представляє собою графічне зображення системи рівнянь, які описують властивості елементів САК.

Структурна схема може також розглядатися як схема проходження і перетворення сигналів у САК. Тому її іноді ще називають алгоритмічною схемою.

Структурну схему САК будують по рівняннях в операторній формі для окремих елементів. Побудову її доцільно почати з елемента порівняння, для чого в лівій частині схеми стрілками відображається сигнал задаючого впливу і

сигнал зворотного зв'язку, прикладений з іншим знаком. Ця обставина підкреслюється затемненням відповідного сектора в зображенні елемента порівняння.

Далі зображується структурна схема кожного елемента з урахуванням діючих впливів.

Передаточну функцію системи по каналу завдання $W_{\omega, u_{30}}(s)$ потрібно визначити, користуючись правилом – передаточна функція між будь-якими сигналами схеми дорівнює дробу, в якому чисельник є добутком передавальних функцій елементів, включених між точками дії вхідного і вихідного сигналів, а знаменник – збільшений на одиницю передавальній функції розімкнутого контуру.

Однією з найважливіших характеристик системи автоматичного керування є стійкість. Цим поняттям характеризується працездатність системи. Система, яка не володіє стійкістю, не здатна виконувати функції керування і має нульову або навіть негативну ефективність (тобто система є шкідливою).

Стійкість автоматичної системи – це властивість системи повернутися у стан рівноваги після припинення дії, яка вивела систему з цього стану.

Значне поширення в інженерній практиці має критерій стійкості Гурвіца. Стосовно до завдань теорії керування критерій Гурвіца можна сформулювати так – система, описувана характеристичним рівнянням:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = 0$$

є стійкою, якщо при $a_n > 0$ позитивні всі визначники Гурвіца $\Delta_n, \Delta_{n-1}, \dots, \Delta_1$.

Ці визначники складають за наступними правилами:

- по головній діагоналі матриці виписуються без пропусків всі коефіцієнти від a_{n-1} до a_0 в порядку зростання індексу;
- стовпці визначника доповнюються вгору від діагоналі коефіцієнтами з послідовно зростаючими і вниз – з послідовно зменшуваними індексами;
- місця коефіцієнтів, індекси яких більші n і менші 0 , заповнюються нулями.

Значення передавального коефіцієнта напівпровідникового підсилювача k_{nn} , при якому проектуєма САК є ще стійкою, визначається шляхом розкриття наведених визначників Гурвіца.

Визначення перехідної характеристики САК $h(t)$ слід виконати за допомогою пакету програм для інженерних розрахунків *MatLab* при значенні k_{nn} , яке забезпечує 10 % перерегулювання. В пояснювальній записці слід привести відповідну програму розрахунку та графік.

Частотні характеристики описують передавальні властивості САК в режимі сталих гармонійних коливань, викликаних зовнішнім гармонійним впливом. Дослідження частотних властивостей САК значно спрощується, якщо використати частотні характеристики, побудовані в логарифмічному масштабі.

Такі характеристики називаються логарифмічними частотними характеристиками (ЛЧХ).

В пояснювальній записці треба привести:

- графік залежності $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$, побудований у логарифмічному масштабі частот, який називається логарифмічною амплітудною частотною характеристикою (ЛАЧХ);

- графік залежності фазової частотної функції $\varphi(\omega)$ від логарифма частоти $\lg \omega$, який називається логарифмічною фазовою частотною характеристикою ЛФЧХ.

Тут $A(\omega) = |W(j\omega)|$, $\varphi(\omega) = \text{Arg } W(j\omega)$, $W(j\omega)$ – частотна передаточна функція, яку можна визначити по передаточній функції $W(s)$ при $s = j\omega$.

У висновках про виконану роботу треба дати характеристику стійкості САК та навести числові характеристики її якості.

2 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Серед споживачів електричної енергії на промислових підприємствах широко поширені різноманітні системи автоматичного керування. До таких споживачів відноситься і система «генератор-двигун» (Г-Д), призначена для управління швидкістю обертання привідного електродвигуна. Принципова схема системи наведена на рисунку 2.

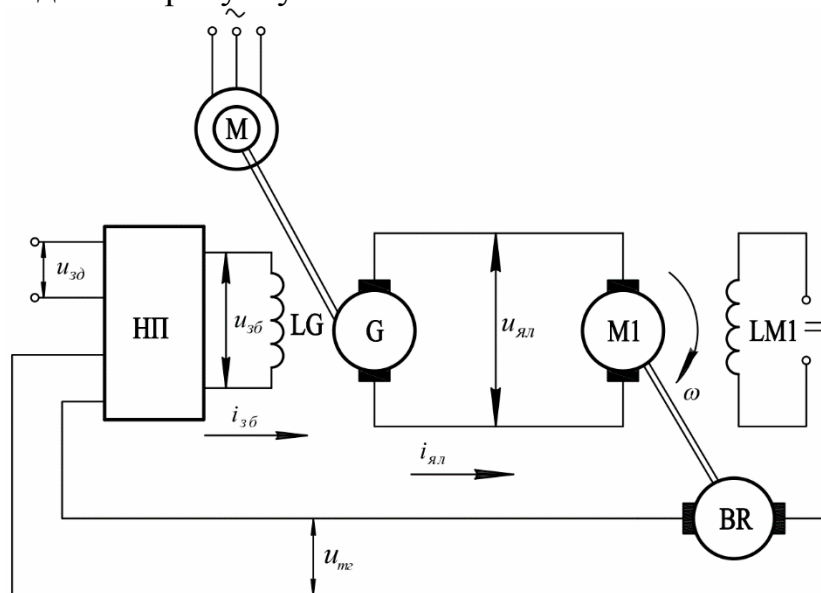


Рисунок 2 – Принципова схема системи Г-Д

На схемі прийняті наступні позначення: *НП* – напівпровідниковий підсилювач; *G* – генератор постійного струму; *M1* – керований електродвигун постійного струму; *BR* – тахогенератор; *LG*, *LM1* – обмотки збудження, відповідно генератора *G* і двигуна *M1*; *M* – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором; $i_{зб}$, $U_{зб}$ – струм та напруга обмотки збудження

генератора; $i_{ял}$ – струм якірної ланцюга системи генератор-двигун; ω – кругова швидкість обертання валу двигуна; $u_{ял}$ – напруга на якірній обмотці двигуна; $u_{зд}$ – напруга сигналу завдання; $u_{тг}$ – вихідна напруга тахогенератора.

Взаємозв'язок елементів системи розглянемо для випадку довільного відхилення швидкості ω в більшу сторону відносно заданого значення.

Спочатку наявність такого відхилення викличе збільшення сигналу зворотного зв'язку $u_{тг}$ на виході тахогенератора. В результаті сигнал неузгодженості $\delta u = u_{зд} - u_{тг}$ на вході напівпровідникового підсилювача зменшиться. Це приведе до зменшення напруги збудження генератора $u_{зб}$, і відповідно, до зменшення напруги $u_{ял}$ на його виході. В результаті двигун зреагує зменшенням швидкості ω .

Числові значення параметрів елементів схеми для варіанту індивідуального завдання № 36 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення параметрів елементів САК для індивідуального завдання №36

№ варіанта	Генератор			Електродвигун				Тахогенератор
	$L_{зг},$ Гн	$R_{зг},$ Ом	$\alpha,$ град	$L_{яд},$ Гн	$R_{яд},$ Ом	$J,$ кгм ²	$c,$ Нм / А	
36	1,49	0,58	36,4	0,008	0,21	1,44	0,68	0,11

Розрахунок САК почнемо зі складання її функціональної схеми, під якою розуміється умовне графічне зображення, що характеризує функції, які виконують окремі елементи системи і зв'язки між цими елементами.

Ця схема наведена на рисунку 3.

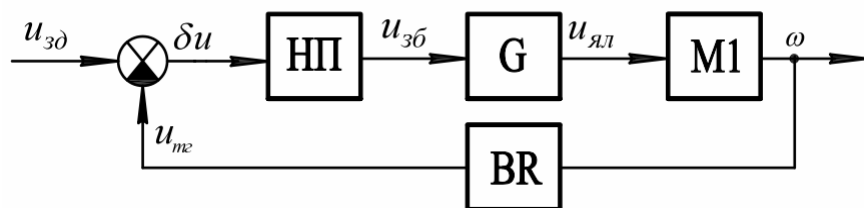


Рисунок 3 – Функціональна схема системи Г-Д

Далі для елементів функціональної схеми складемо відповідні математичні моделі. Розглянемо генератор по каналу: $u_{зб}$ – вхід; $u_{ял}$ – вихід.

Скориставшись даними літературних джерел, фізику процесів у генераторі представимо системою рівнянь:

– рівнянням електричної рівноваги ланцюга збудження (закон Кірхгофа)

$$u_{зб} = R_{зз} i_{зб} + L_{зз} \frac{di_{зб}}{dt};$$

– рівнянням електричної рівноваги якірної обмотки

$$e_z = u_{ял} + R_{яз} i_{ял} + L_{яз} \frac{di_{ял}}{dt};$$

– рівнянням характеристики холостого ходу

$$e_z = f(i_{зб}).$$

Прийmemo допущення про те, що $R_{яз} \approx 0$ і $L_{яз} \approx 0$, тобто $u_{ял} \approx e_z$ (зневажимо втратами напруги в якірній обмотці генератора).

Введемо нові змінні: $u_{зб} = u_{зб,0} + \Delta u_{зб}$ і $i_{зб} = i_{зб,0} + \Delta i_{зб}$, де $u_{зб,0}$ та $i_{зб,0}$ – значення відповідних змінних у точці лінеаризації. Тоді

$$u_{зб,0} + \Delta u_{зб} = R_{зз} i_{зб,0} + R_{зз} \Delta i_{зб} + L_{зз} \frac{d\Delta i_{зб}}{dt}. \quad (1)$$

Віднявши з рівняння (1) рівняння рівноваги $u_{зб,0} = R_{зз} i_{зб,0}$, одержимо наступне рівняння у відхиленнях:

$$\Delta u_{зб} = R_{зз} \Delta i_{зб} + L_{зз} \frac{d\Delta i_{зб}}{dt}. \quad (2)$$

Далі виконаємо лінеаризацію характеристики холостого ходу генератора в околицях точки рівноваги $[i_{зб,0}, e_{z,0}]$:

$$\Delta e_z = \left. \frac{de_z}{di_{зб}} \right|_0 \cdot \Delta i_{зб} = tg \alpha \cdot \Delta i_{зб}. \quad (3)$$

Підставивши $\Delta i_{зб}$ з (3) в (2), одержимо:

$$\Delta u_{зб} = \frac{R_{зз}}{tg \alpha} \cdot \Delta e_z + \frac{L_{зз}}{tg \alpha} \cdot \frac{d\Delta e_z}{dt},$$

або у стандартній формі урахувавши, що ми прийняли $u_{ял} \approx e_z$:

$$T_z \frac{d\Delta u_{ял}}{dt} + \Delta u_{ял} = k_z \Delta u_{зб}, \quad (4)$$

де $T_z = L_{зз} / R_{зз}$ – постійна часу і $k_z = tg \alpha / R_{зз}$ – передаточний коефіцієнт генератора.

Скориставшись даними для індивідуального завдання №36 з таблиці 2 $L_{\Sigma} = 1,49 \text{ Гн}$, $R_{\Sigma} = 0,58 \text{ Ом}$, $\alpha = 36,4 \text{ град}$, маємо – $T_c = 1,49/0,58 = 2,569 \text{ с}$, $k_c = \text{tg}(36,4)/0,58 = 1,271$.

Відповідно до функціональної схеми рівняння двигуна складемо по каналу: $u_{ял}$ – вхід; ω – вихід.

Для цього елемента фізику процесів можемо описати системою рівнянь:
– рівнянням електричної рівноваги якірної обмотки

$$u_{ял} = e_{\partial} + R_{я\partial} i_{ял} + L_{я\partial} \frac{di_{ял}}{dt}; \quad (5)$$

– рівнянням руху приводу

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial} - M_{on} \quad (6)$$

Тут: $M_{\partial} = k\Phi i_{ял} = |\Phi = const| = c i_{ял}$ – обертальний момент, що розвиває двигун на валу; M_{on} – момент опору навантаження, приведений до валу двигуна.

Рівняння (6) перепишемо у вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = c i_{ял} + c i_{on}, \text{ де } i_{on} = M_{on}/c.$$

Звідки

$$i_{ял} = \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + i_{on} \text{ і } \frac{di_{ял}}{dt} = \frac{J}{c} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{di_{on}}{dt}.$$

Підставимо два останніх співвідношення в рівняння (5) з урахуванням того, що $e_{\partial} = k\Phi\omega = c\omega$:

$$u_{ял} = c\omega + \frac{JR_{я\partial}}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + R_{я\partial} i_{ял} + \frac{JL_{я\partial}}{c} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + L_{я\partial} \cdot \frac{di_{on}}{dt}.$$

Приведемо отримане рівняння до стандартного вигляду:

$$\frac{JL_{я\partial}}{c^2} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{JR_{я\partial}}{c^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{c} u_{ял} - \frac{R_{я\partial}}{c} \left(\frac{L_{я\partial}}{R_{я\partial}} \cdot \frac{di_{on}}{dt} + i_{on} \right).$$

Введемо позначення:

$JL_{я\partial}/c^2 = T_m$ – електромеханічна постійна часу;

$L_{я\partial}/R_{я\partial} = T_e$ – електромагнітна постійна часу;

$1/c = k_{\partial u}$ – передаточний коефіцієнт по напрузі на якірній обмотці;

$R_{я\partial}/c = k_{\partial i}$ – передаточний коефіцієнт по струму опору навантаження.

Тоді остаточно можемо записати:

$$T_e T_m \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{\partial u} u_{ял} - k_{\partial i} \left(T_e \cdot \frac{di_{on}}{dt} + i_{on} \right),$$

або у відхиленнях:

$$T_e T_m \cdot \frac{d^2 \Delta \omega}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = k_{\partial u} \Delta u_{ял} - k_{\partial i} \left(T_e \cdot \frac{d\Delta i_{on}}{dt} + \Delta i_{on} \right) \quad (7)$$

Таким чином, електродвигун можна представити математичною моделлю, що має два входи: $u_{ял}$ і i_{on} .

Скориставшись даними з таблиці 2 $L_{я\partial} = 0,008 \text{ Гн}$, $R_{я\partial} = 0,21 \text{ Ом}$, $J = 1,44 \text{ кгм}^2$, $c = 0,68 \text{ Нм/А}$, маємо:

$$k_{\partial u} = 1/0,68 = 1,4706 \text{ с/В}; \quad k_{\partial i} = 0,21/0,68 = 0,3088 \text{ с/А};$$

$$T_m = 1,44 \cdot 0,21/0,68^2 = 0,654 \text{ с}; \quad T_e = 0,008/0,21 = 0,0381 \text{ с}.$$

Рівняння напівпровідникового підсилювача по каналу δu – вхід, $u_{зб}$ – вихід запишемо у вигляді:

$$u_{зб} = k_{nn} \delta u,$$

де k_{nn} – передаточний коефіцієнт.

У відхиленнях це рівняння має наступний вигляд:

$$\Delta u_{зб} = k_{nn} \delta(\Delta u). \quad (8)$$

Рівняння тахогенератора по каналу ω – вхід, u_{m2} – вихід, зневажаючи динамікою процесів у ньому, запишемо у вигляді:

$$u_{m2} = k_{m2} \omega,$$

або у відхиленнях:

$$\Delta u_{m2} = k_{m2} \Delta \omega, \quad (9)$$

де $k_{m2} = 0,11 \text{ сВ}$ – передаточний коефіцієнт.

Рівняння замикання контуру САК у відхиленнях запишемо як:

$$\delta(\Delta u) = \Delta u_{з\delta} - \Delta u_{m\epsilon}, \quad (10)$$

Надалі умовимося знак Δ у рівняннях елементів не ставити, вважаючи всі змінні і їхні похідні малими відхиленнями від заданих значень. Тоді систему рівнянь САК можна подати в наступному вигляді

$$\left. \begin{aligned} T_e \frac{du_{ял}}{dt} + u_{ял} &= k_e u_{з\delta}; \\ T_e T_m \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega &= k_{\partial u} u_{ял} - k_{\partial i} \left(T_e \cdot \frac{di_{on}}{dt} + i_{on} \right); \\ u_{з\delta} &= k_{nn} \delta u; \\ u_{m\epsilon} &= k_{m\epsilon} \omega; \\ \delta u &= u_{з\delta} - u_{m\epsilon}. \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Для визначення передаточних функцій елементів системи використовуємо інтегральне перетворення Лапласа (L -перетворення) рівнянь цих елементів (11) при нульових початкових умовах:

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt.$$

В результаті одержуємо наступну систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} T_e s U_{ял}(s) + U_{ял}(s) &= k_e U_{з\delta}(s); \\ T_e T_m s^2 \Omega(s) + T_m s \Omega(s) + \Omega(s) &= k_{\partial u} U_{ял}(s) - k_{\partial i} (T_e s I_{on}(s) + I_{on}(s)); \\ U_{з\delta}(s) &= k_{nn} \Delta U(s); \\ U_{m\epsilon}(s) &= k_{m\epsilon} \Omega(s); \\ \Delta U(s) &= U_{з\delta}(s) - U_{m\epsilon}(s). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Передаточною функцією елемента САК за визначенням називається відношення його вихідної величини до вхідної, перетворених за Лапласом при нульових початкових умовах. Тоді, скориставшись співвідношеннями (12), після перетворень одержимо:

$$\left. \begin{aligned} W_z(s) &= \frac{U_{ял}(s)}{U_{зб}(s)} = \frac{k_z}{T_z s + 1}; \\ W_{\partial u}(s) &= \frac{\Omega_u(s)}{U_{ял}(s)} = \frac{k_{\partial u}}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}; \\ W_{\partial i}(s) &= \frac{\Omega_i(s)}{I_{on}(s)} = \frac{k_{\partial i}}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}; \\ W_{nn}(s) &= \frac{U_{зб}(s)}{\Delta U(s)} = k_{nn}; \\ W_{mz}(s) &= \frac{U_{mz}(s)}{\Omega(s)} = k_{mz}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Скориставшись знайденими передаточними функціями елементів, структурну схему САК представимо у вигляді, наведеному на рисунку 4.

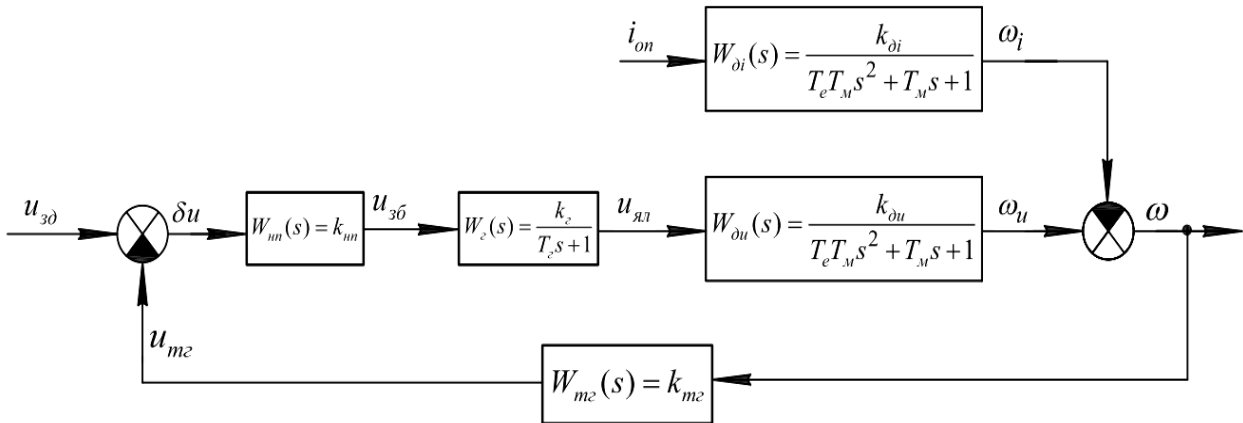


Рисунок 4 – Структурна схема системи

Скориставшись останньою схемою, знайдемо передаточну функцію системи по каналу дії завдання

$$\begin{aligned} W_{\omega, u_{зб}}(s) &= \frac{\Omega(s)}{U_{зб}(s)} = \frac{W_{nn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_{\partial u}(s)}{1 + W_{nn}(s) \cdot W_z(s) \cdot W_{\partial u}(s) \cdot W_{mz}(s)} = \\ &= \frac{k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{\partial u}}{T_z T_e T_M s^3 + T_M (T_z + T_e) s^2 + (T_z + T_M) s + (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{\partial u} \cdot k_{mz})} \end{aligned} \quad (14)$$

Звідси знайдемо характеристичне рівняння системи

$$T_z T_e T_M s^3 + T_M (T_z + T_e) s^2 + (T_z + T_M) s + (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{\partial u} \cdot k_{mz}) = 0$$

Діапазон можливих значень передаточного коефіцієнта напівпровідникового підсилювача k_{nn} визначимо, скориставшись алгебраїчним критерієм стійкості Гурвіца.

Для цього складемо головний визначник нашої системи:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} T_M(T_e + T_e) & (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}) & 0 \\ T_e T_e T_M & (T_e + T_M) & 0 \\ 0 & T_M(T_e + T_e) & (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}) \end{vmatrix} \quad (15)$$

Звідси можна одержати визначник Гурвіца 2-го порядку і зажадати, щоб він був більшим нуля:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \begin{vmatrix} T_M(T_e + T_e) & (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}) \\ T_e T_e T_M & (T_e + T_M) \end{vmatrix} = \\ &= T_M(T_e + T_e) \cdot (T_e + T_M) - (1 + k_{nn} \cdot k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}) \cdot T_e T_e T_M > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

З нерівності (16) остаточно маємо

$$k_{nn} < \frac{T_M(T_e + T_e) \cdot (T_e + T_M)}{T_e T_e T_M \cdot k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}} - \frac{1}{k_z \cdot k_{du} \cdot k_{mz}} \quad (17)$$

Підставивши в (17) значення параметрів, одержимо:

$$k_{nn} < 412,67$$

Таким чином, проектувана система автоматичного керування при заданих параметрах генератора, електродвигуна і тахогенератора для індивідуального завдання №36 з таблиці 2 буде стійко працювати за умови, що коефіцієнт передачі напівпровідникового підсилювача знаходиться в діапазоні $0 < k_{nn} < 412,67$.

Визначення перехідної характеристики по каналу сигналу завдання виконаємо засобами програми *MatLab* при значенні $k_{nn} = 15,7$, яке забезпечує 10 % перерегулювання σ . При цьому передаточна функція САК відповідно виразу (14) має вигляд:

$$W_{\omega, u_{zd}}(s) = \frac{6,941}{0,01514s^3 + 0,4032s^2 + 0,7622s + 1}$$

Алгоритм програми наведений нижче.

```
% Параметри генератора
Lvg=1.49;Rvg=0.58;alfa=36.4
Kg=tand(alfa)./Rvg,Tg=Lvg./Rvg
% Параметри двигуна
c= 0.68;J= 1.44;Lid= 0.008;Rid= 0.21;
Kdu=1./c,Kdi=Rid./c,Te=Lid./Rid,Tm=J.*Rid./(c^2)
% Параметри тахогенератора
Kbr= 0.11;
% Визначення  $k_{nn}$  напівпровідникового підсилювача
Kpu=(Tm.*(Tg+Te).*(Tg+Tm))./(Tg.*Te.*Tm.*Kg.*Kdu.*Kbr)-
1./(Kg.*Kdu.*Kbr)
Kpu=input('Введіть необхідне значення Kpu - ')
% Визначення передаточних функцій елементів
Wg=tf([Kg],[Tg 1]); Wdu=tf(Kdu,[Te*Tm Tm 1]); Wdi=tf([Kdi*Tedi],
[Te*Tm Tm 1]); Wbr=tf(Kbr); Wpu=tf(Kpu);
% Визначення передаточної функції САК по задаючому впливу
Wsu=minreal(Wpu*Wg*Wdu/(1+Wpu*Wg*Wdu*Wbr));
[cisl,znam]=tfdata(Wsu,'v');n=length(znam);
Wsu=tf(cisl/znam(n),znam/znam(n))
% Визначення перехідної характеристики
step(Wsu,7)
```

Графік перехідної характеристики зображено на рисунку 5.

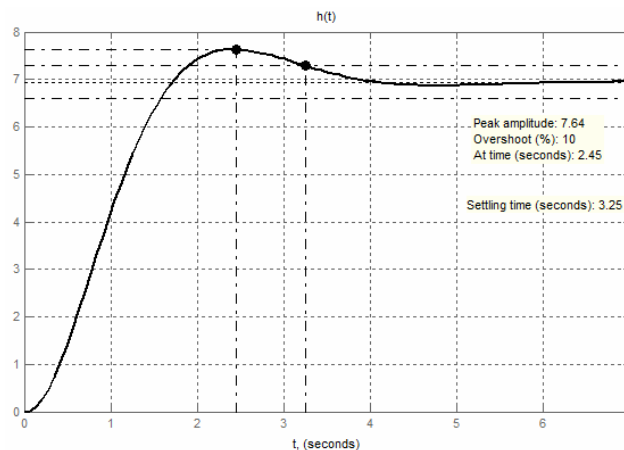


Рисунок 5 – Перехідна характеристика САК по задаючому впливу при $k_{nn} = 15,7$

Логарифмічні частотні характеристики визначимо шляхом заміни в алгоритмі програми команди *step(Wsu,7)* на команду *bode (Wsu)*. Відповідні ЛАЧХ і ЛФЧХ наведені на рисунку 6.

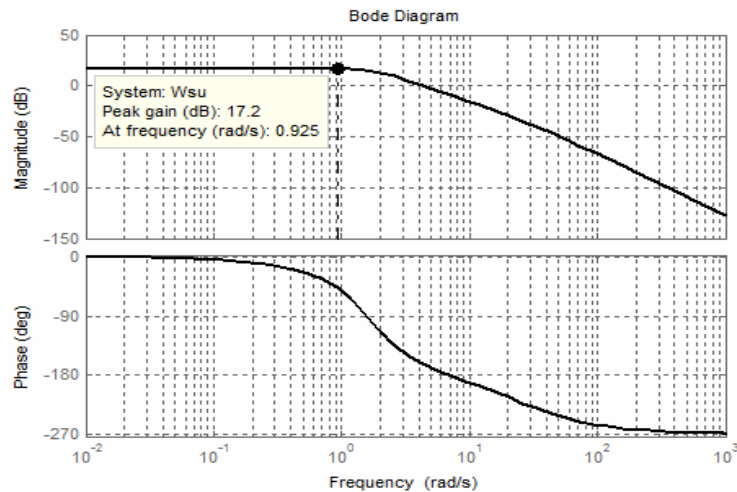


Рисунок 6 – ЛАЧХ и ЛФЧХ системи при $k_{nn} = 15,7$

Для визначення напруги сигналу завдання u_{30} , який забезпечує необхідне значення керованої координати $n = 1500$ об/хв, в кінці алгоритму програми потрібно додати команди:

```
% Завдання необхідного значення керованої координати n, [об/хв]
Nzad=1500
% Визначення напруги сигналу завдання  $u_{30}$  [В]
Wzad=Nzad*(pi)/30,[cisl]=tfdata(Wsu,'v');Uzad=Wzad/cisl(n)
```

В результаті запуску програми на виконання одержуємо $\omega_{30} = 157,1$ рад/с і $u_{30} = 22,63$ В.

Для перевірки знаходження внутрішніх змінних в допустимих діапазонах використаємо блок-схему САК Г-Д, сформовану в інтерактивному середовищі *Simulink*, яка наведена на рисунку 7.

Як видно з рисунка, після закінчення перехідного процесу внутрішні змінні набули значень: $u_{m2} = 17,28$ В, $\delta u = 5,353$ В, $u_{36} = 84,04$ В, $u_{ял} = 106,8$ В, $n = 1500$ об/хв, що є допустимим.

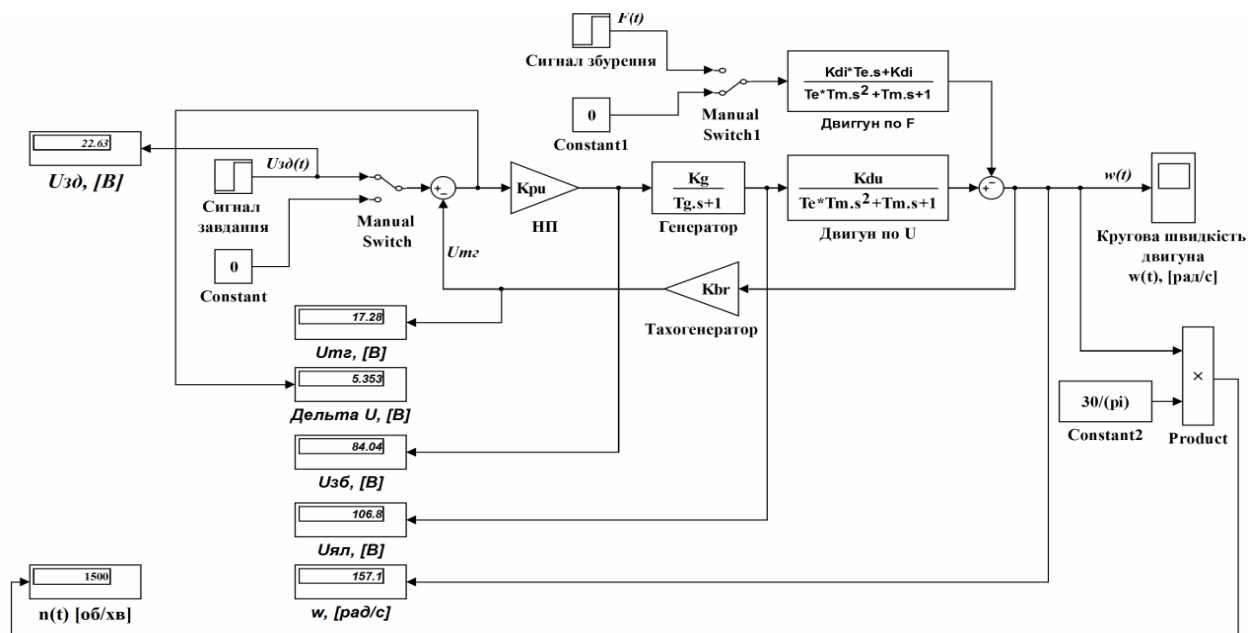


Рисунок 7 – Блок-схема імітаційного моделювання САК
при $k_{nn} = 15,7$ і $n = 1500$ об/хв

Висновки

1. Система є стійкою і має властивості фільтра високих частот.
2. Якість системи характеризується перерегулюванням $\sigma = 10$ % і часом регулювання $t_p = 4,25$ с .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессекерский В. А. Теория автоматического управления: учебн. пособ./ В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2004. – 750 с.
2. Абраменко И. Г. Компьютерные технологии в автоматизированных системах управления электроснабжения: учебн. пособ. / И. Г. Абраменко, А. И. Кузнецов. – Х.: ХНАГХ, 2008. – 146 с.
3. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
4. Герман-Галкин С. Г. Matlab и Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА–Век, 2008. – 368 с.
5. Лазарев Ю. Ф. Моделирование процессов и технических систем в MATLAB / Ю. Ф. Лазарев. – К.: Ирида, 2004. – 474 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання розрахунково-графічної роботи
з курсу

ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

*(для студентів 3 курсу заочної форми навчання
за напрямом 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та слухачів другої вищої освіти, за спеціальністю
7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання (за видами))*

Укладачі: **АБРАМЕНКО** Іван Григорович
КАРЮК Андрій Олександрович
РУМ'ЯНЦЕВ Дмитро Валерійович

Відповідальний за випуск: *В. М. Гаряжа*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання: *А. О. Карюк*

План 2014, поз. 190М

Підп. до друку 12.12.2014
Друк на ризографі.
Зам. №

Формат 60 x 84/16
Ум. друк. арк. 1,4
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК 4705 від 28.03.2014 р.